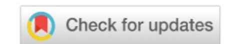
ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





УДК 622.8:65.012.12 *Научная статья*
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-40-54

Имитационное моделирование процесса реализации риска аварии при проведении вскрышных работ на угольном разрезе

М.А. Ковалев[1] ✉, **В.В. Москвичев**[1,2]
[1] Красноярский филиал Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Российская Федерация
[2] Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация
✉ kovalevmalk@gmail.com

Аннотация
Введение. Необходимость повышения уровня комплексной безопасности, снижения показателей аварийности и травматизма, минимизации риска отказов, аварий и катастроф предопределяет актуальность исследований взаимосвязи элементов системы «человек – машина – среда» («Ч–М–С») при проведении открытых горных работ. Одним из наиболее эффективных механизмов исследования функциональных характеристик системы «Ч–М–С» угольного разреза является проведение имитационного моделирования с целью выявления проблемных ситуаций, являющихся триггерами аварий с катастрофическими последствиями и травмированием персонала. Имитационное моделирование технологического процесса предполагает конструирование модели реальной системы и постановку вычислительных экспериментов для описания поведения системы и оценки различных стратегий, обеспечивающих её функционирование. Целью данного исследования является адаптация технологий имитационного моделирования для решения проблемы комплексной безопасности при проведении открытых горных работ. В рамках исследования поставлена задача определения элементов, вносящих наибольший вклад в реализацию рисков в системе «Ч–М–С» при проведении вскрышных работ на угольном разрезе. В качестве моделируемых подсистем выступают «человек», «машина», «среда», «погодные условия».
Материалы и методы. Процесс вскрышных работ рассмотрен в методологии ARIS eEPC (extended Event Driven Process Chain) как бизнес-процесс, связывающий совокупность подпроцессов и/или бизнес-операций. Для построения имитационной модели в программной среде AnyLogic бизнес-процесс вскрышных работ в нотации ARIS eEPC описан графом, представляющим структуру, состоящую из объектов и связей между ними. Данный подход позволяет структурировать последовательность событий и операций и определить альтернативные исходы, возникающие в процессе выполнения вскрышных работ.
Результаты исследования. В рамках исследования разработан метод трансляции формальной модели бизнес-процесса вскрышных работ в нотации ARIS eEPC в комбинированную имитационную модель AnyLogic. На основе разработанного метода проведена серия машинных экспериментов, определены элементы, оказывающие влияние на реализацию риска аварий в системе «Ч–М–С» угольного разреза.
Обсуждение и заключение. Технологии имитационного моделирования впервые в отечественной практике исследований системы «Ч–М–С» получили приложение для анализа показателей комплексной безопасности при проведении открытых горных работ. По результатам имитационного эксперимента установлено, что основное влияние на снижение надежности подсистемы «машина» оказывает человеческий фактор, который в совокупности с психофизиологическими свойствами человека усиливает развитие эффекта домино при реализации рисков различных типов. Представленные результаты и опытная апробация технологии имитационного моделирования могут иметь расширенное использование при анализе безопасности сложных технических систем с учетом влияния человеческого и техногенного факторов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, система «человек – машина – среда», событийный анализ риска на угольном разрезе, агентное моделирование вскрышного забоя, AnyLogic, eEPC, ARIS

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Ковалев М.А., Москвичев В.В. Имитационное моделирование процесса реализации риска аварии при проведении вскрышных работ на угольном разрезе. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(4):40–54. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-40-54

Original article

Simulation Modeling of the Process of Accident Risk Realization during Stripping Operations at an Open-Pit Coal Mine

Maksim A. Kovalev[1] ✉, **Vladimir V. Moskvichev**[1,2]

[1] Krasnoyarsk branch of FRC ICT, Krasnoyarsk, Russian Federation

[2] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ kovalevmalk@gmail.com

Abstract

Introduction. The need to increase the level of comprehensive safety, reduce accident and injury rates, minimize the risk of failures, accidents and catastrophes determines the relevance of research on the relationship of elements of the "human–machine–environment" (H–M–E) system during open-pit mining. One of the most effective mechanisms for studying the functional characteristics of the H–M–E system of a coal mine is to conduct simulation modeling in order to identify problematic situations that trigger accidents with catastrophic consequences and injury to personnel. Simulation modeling of a technological process involves constructing a model of a real system and setting up computational experiments to describe the behavior of the system and evaluate various strategies that ensure its functioning. The aim of the research was to adapt simulation modeling technologies to solve the problem of complex safety during open-pit mining. Within the framework of the study, the task was to determine the elements that made the greatest contribution to the implementation of risks in the H–M–E system during stripping operations at a coal mine. The simulated subsystems were "human", "machine", "environment", and "weather conditions".

Materials and Methods. Stripping process was considered in the ARIS eEPC (extended Event Driven Process Chain) methodology as a business process linking a set of subprocesses and/or business operations. To build a simulation model in the AnyLogic software environment, the business process of stripping works in ARIS eEPC notation was described by a graph representing a structure consisting of objects and connections between them. This approach allowed us to structure the sequence of events and operations and determine alternative outcomes that arose during stripping operations.

Results. As part of the research, a method was developed for translating the formal model of the stripping business process in ARIS eEPC notation into a combined simulation model of AnyLogic. Based on the developed method, a series of machine experiments was carried out. The elements influencing the realization of the risk of accidents in the H–M–E system of a coal mine were determined.

Discussion and Conclusion. For the first time in the domestic practice of research of the H–M–E system, simulation modeling technologies have received an application for the analysis of complex safety indicators during open-pit mining. According to the simulation experiment results, it was found that the main influence on the decrease in the reliability of the "machine" subsystem was exerted by the human factor, which, together with the psychophysiological properties of a person, enhanced the development of the domino effect when implementing various types of risks. The presented results and experimental approbation of simulation modeling technology can have advanced use in the analysis of complex technical systems safety, taking into account the influence of human and man-made factors.

Keywords: simulation modeling, “human-machine-environment” system, analysis of risk at an open-pit coal mine, agent-based modeling of overburden face, AnyLogic, eEPC, ARIS

Acknowledgements. The authors would like to thank the editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Kovalev MA, Moskvichev VV. Simulation Modeling of the Process of Accident Risk Realization During Stripping Operations at an Open-Pit Coal Mine. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):40–54. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-40-54

Введение. При проведении вскрышных работ на угольных разрезах вопросы повышения безопасности, снижения аварийности, исключения случаев травматизма постоянно находились и находятся в центре особого внимания. Именно они придают актуальность всем исследованиям в данной области. Современный взгляд на

проблему формирования предпосылок аварий на угольном разрезе предлагает рассматривать их в формате системы «Ч–М–С», развитой в работах [1, 2]. Система включает в себя оператора-машиниста экскаватора, бульдозера, буровой установки, водителя автосамосвала («человек»), карьерный экскаватор, бульдозер, буровую установку, автосамосвал («машина»), вскрышной забой, угольный забой, буровой блок («рабочая среда»). Данные подсистемы взаимодействуют между собой по заданной технологии и установленной организации работ в рамках технологического процесса. Помимо основных компонентов системы, ее модель включает в себя связи между ними и окружающей внешней средой, к которой отнесены погодные условия, горно-геологический фактор (крепость породы, уровень грунтовых вод, устойчивость борта разреза).

Функционирование системы «Ч–М–С» сопровождается реализацией различных видов и групп риска, которые необходимо своевременно идентифицировать и принимать необходимые меры, направленные на защиту системы и смягчение последствий в случае возникновения опасности. Эффективным механизмом исследования функциональных характеристик моделируемой системы «Ч–М–С» угольного разреза и выявления проблемных ситуаций, выступающих триггерами аварий с катастрофическими последствиями и травмированием персонала, является проведение имитационного моделирования.

Имитационное моделирование технологического процесса предполагает конструирование модели исследуемой системы и постановку вычислительных экспериментов с целью описания её поведения и оценки (в рамках ограничений, накладываемых некоторым критерием или их совокупностью) различных стратегий, обеспечивающих функционирование данной системы [3]. Имитационное моделирование является ключевым инструментом исследования поведения реальных систем, но не решает оптимизационных задач, а, скорее, представляет собой технологию оценки значений функциональных характеристик моделируемой системы, позволяя выявлять её проблемные места [4]. Имитационные модели широко применяются для прогнозирования поведения логистических систем, при проектировании и размещении предприятий, оптимизации существующих процессов, для обучения и тренировки персонала и т. д.

В настоящее время в области имитационного моделирования выделяют три основных направления: системная динамика, дискретно-событийное и агентское моделирование. Отличаются данные направления уровнем абстракции моделируемых в их среде моделей. Отмечают три уровня абстракции имитационного моделирования: стратегический (высокоуровневые стратегии, моделирующие поведение людей, организаций), тактический (построение моделей систем массового обслуживания и моделей бизнес-процессов), оперативный (построение моделей мехатронных систем, уличного и пешеходного движение и т. д.) [5, 6].

Процесс проведения вскрышных работ на угольном разрезе можно рассматривать в методологии ARIS eEPC (extended Event Driven Process Chain — расширенная нотация описания цепочки процесса) как описание потока последовательно выполняемых работ, расположенных в порядке их выполнения [7]. Данная ситуация представляется как бизнес-процесс, связывающий совокупность подпроцессов, и/или бизнес-операций, и/или бизнес-функций, в ходе выполнения которых потребляются определенные ресурсы и создается продукт (вещественный или нематериальный результат человеческого труда: предмет, услуга, научное открытие, идея), представляющий ценность для потребителя [8].

Имитационное моделирование осуществляется в среде программного обеспечения AnyLogic, представляющего собой гибкую мультиагентную моделирующую платформу, которая используется для создания разнообразных имитационных моделей в области бизнеса, инженерии, логистики и в других сферах. Разные средства спецификации и анализа результатов, имеющиеся в AnyLogic, позволяют строить модели (динамические, дискретно-событийные, агентные), имитирующие практически любой реальный процесс, выполнять компьютерный анализ моделей без проведения реальных экспериментов и сложных вычислительных процедур [9].

Исходя из целей исследования и с учетом опыта применения технологии имитационного моделирования сформулированы следующие задачи, которые должны быть решены в данной работе:

1. Описать процесс проведения вскрышных работ в нотации eEPC.

2. Транслировать модель вскрышного забоя из нотации eEPC в комбинированную модель программной среды AnyLogic, провести серию имитационных экспериментов.

3. Сравнить результаты имитационных экспериментов моделирования процесса возникновения риска и его перерастания в причинно-следственную последовательность катастрофической аварии и травмирования персонала при проведении вскрышных работ в системе «Ч–М–С» угольного разреза.

Материалы и методы. Бизнес-процесс проведения вскрышных работ на угольном разрезе в нотации eEPC [10, 11] можно описать графом как $G = \{X, V\}$, где X и V являются основными компонентами модели (рис. 1).

На рис. 1. G (граф) представляет собой структуру, состоящую из объектов и связей между ними. В данном контексте граф описывает процесс вскрышных работ и его логическую структуру. Она помогает визуализировать последовательность событий и операций, а также определять, какие альтернативные исходы могут возникнуть в процессе выполнения работ. На рис. 2 представлены основные типы объектов графа, используемые при построении имитационной модели.

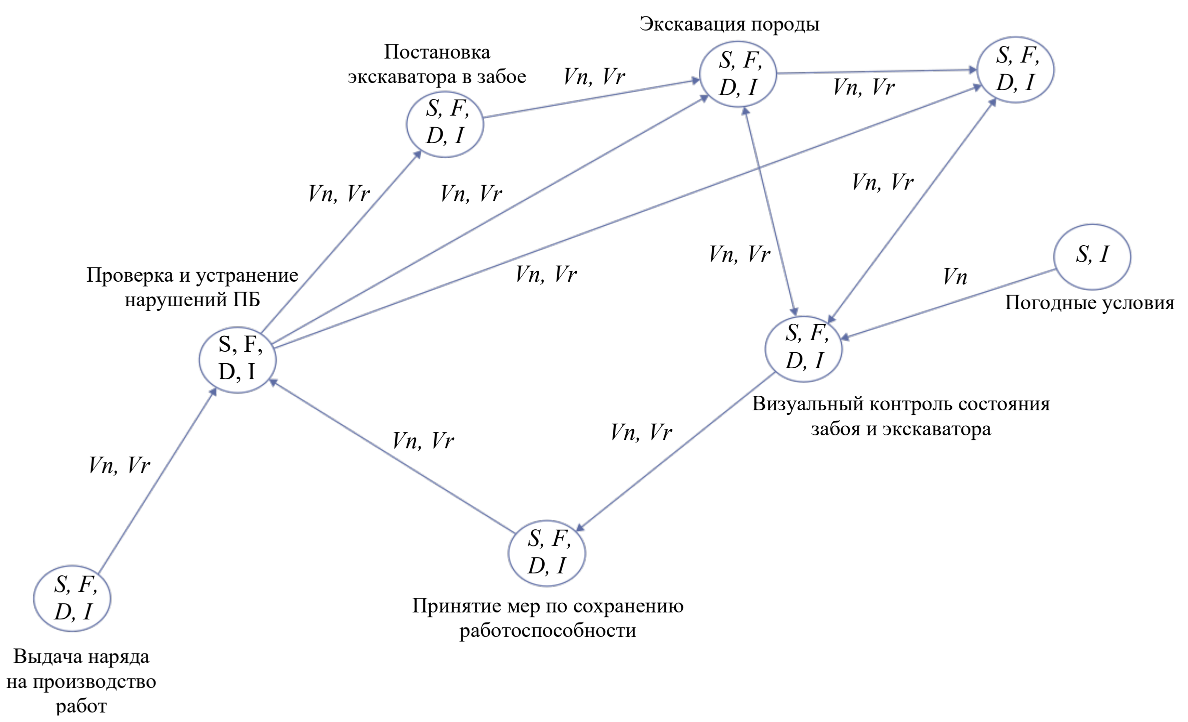


Рис 1. Граф процесса вскрышных работ

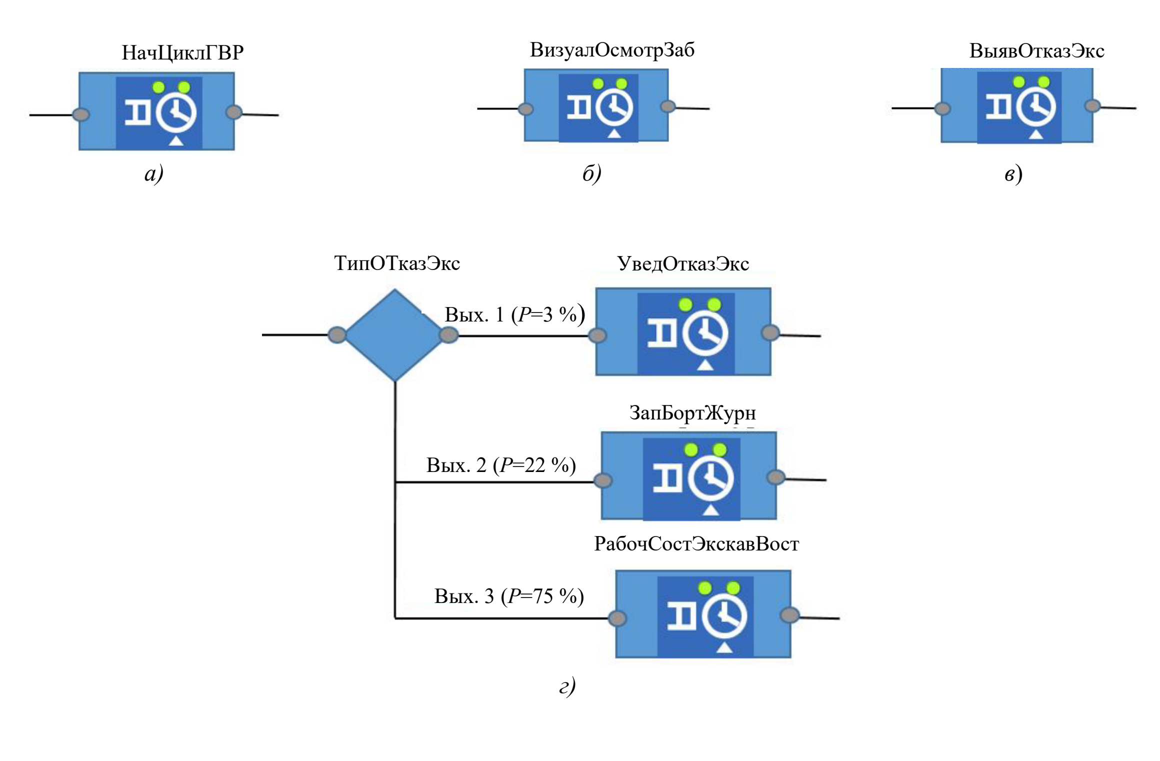
1. *X* — множество объектов модели (вершин графа), где *X* = {*S*, *F*, *D*, *I*} и состоит из четырех типов объектов:

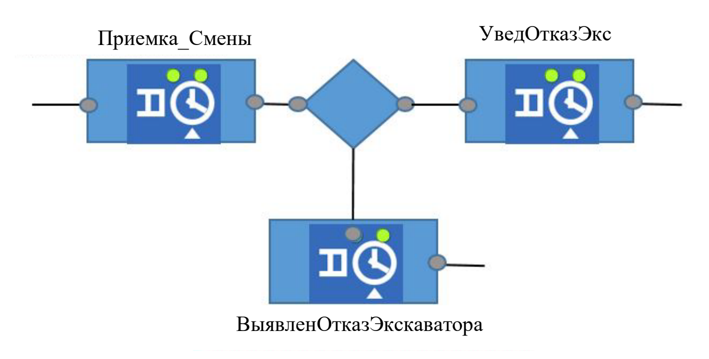
– *S* (события): эти объекты представляют собой различные события или этапы, которые происходят в процессе вскрышных работ, например «Постановка экскаватора в забое», «Экскавация породы», «Погрузка породы в транспортный сосуд». Пример реализации данного объекта в имитационной модели представлен сервисным блоком «Начало цикла горно-выемочных работ» на рис. 2 *а*.

– *F* (функция): функциональные объекты, которые могут применяться во время технологических операций. Это операции, необходимые для успешного завершения процесса, например визуальный контроль текущего состояния экскаватора или забоя, контроль положения автосамосвала и другого технологического оборудования или людей в забое. Пример реализации данного объекта в имитационной модели представлен сервисным блоком «Визуальный осмотр забоя» на рис. 2 *б*.

– *D* (операция): операции, требуемые для выполнения вскрышных работ, например проведение технического осмотра или ремонта экскаватора, устранение нарушений правил безопасности и так далее. Пример реализации данного объекта в имитационной модели представлен сервисным блоком «Выявление отказа экскаватора» на рис. 2 *в*.

– *I* (правило XOR/OR): эти объекты определяют логику ветвления и слияния в процессе. Правило OR указывает, что после выполнения нескольких альтернативных событий процесс может продолжаться, если хотя бы одно из них завершено. Например, машинист проверяет рабочее состояние экскаватора в начале смены. У данного события может быть два исхода: «техническое состояние исправно»; «обнаружены неисправности». Оба исхода ведут к реализации различных ветвей событий развития модели. Оператор XOR означает, что выбирается только один из нескольких альтернативных путей развития модели. Например, при выявлении отказа оборудования экскаватора машинистом оператор XOR задает вероятности реализации альтернативных исходов: «рабочее состояние экскаватора восстановлено», «выявлены неисправности, не влияющие на работу экскаватора», «эксплуатация экскаватора небезопасна». Пример реализации данного объекта в имитационной модели представлен блоком SelectOutput «Тип отказа экскаватора, правило XOR» на рис. 2 *г*.





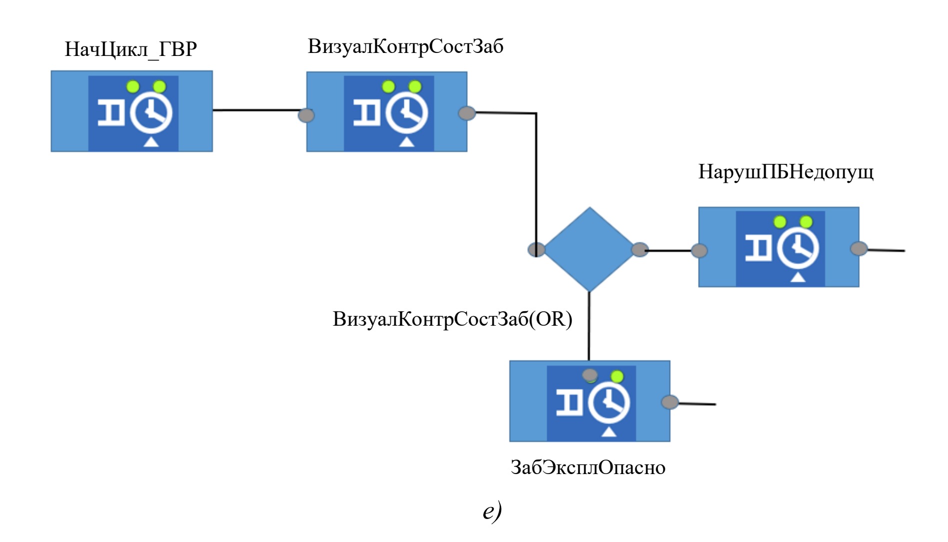


Рис. 2. Схема реализации объектов графа в имитационной модели:
а — «событие» (начало цикла горно-выемочных работ); *б* — «функция» (визуальный осмотр забоя);
в — «операция» (выявление отказов экскаватора); *г* — «правило XOR» (реализация типа отказа экскаватора);
д — «дуга» (переход от приемки смены к проверке рабочего состояния экскаватора); *е* — «ребро» (альтернативные пути ветвления дальнейшего процесса при визуальном контроле состояния забоя)

2. *V* — множество дуг и ребер, которые связывают объекты из множества, то есть вершины графа. *V* разделяется на два подмножества:

– *Vn* (дуги): эти связи между объектами указывают на последовательность событий или операций. Например, «Приемка смены» связана с «Проверкой рабочего состояния экскаватора», так как это следующий шаг в процессе. Пример реализации «дуги» в имитационной модели представлен на рис. 2 *д*.

– *Vr* (ребра): ребра соединяют вершины с правилами XOR/OR, что определяет, какие альтернативные пути ветвления могут возникнуть в процессе. Например, после начала «Экскавации породы» может быть ребро, которое соединяет с оператором OR. Это означает, что после извлечения породы из целика может возникнуть несколько различных событий («допущено нарушение безопасности», «нет нарушения безопасности»), и процесс продолжится, если хотя бы одно из них завершено. Пример реализации ребра в имитационной модели представлен на рис. 2 *е*.

Агентная составляющая модели в AnyLogic реализуется с помощью базового объекта — активного объекта. Активный объект имеет параметры, переменные, которые можно считать памятью агента, стейтчарты выражают поведение: состояния объекта и изменение состояний под воздействием событий и условий. Агентом в имитационной модели процесса вскрышных работ выступает блок «Среда». Логика модели предусматривает, что «Среда» оказывает влияние на величину ошибки машиниста при обработке входящей информации. В модели влияние «Среды» на восприятие информации машинистом реализовано моделированием состояния погодных условий. Сильный дождь приводит к ухудшению видимости из кабины машиниста, что может быть причиной некорректного восприятия информации о состоянии забоя или текущего состояния узлов экскаватора. Сильный ветер поднимает облако угольной пыли, которая также нарушает визуальный контакт между машинистом и забоем. Поэтому, когда «Среда» не образует сигнал об изменении погодных условий, вероятность ошибки машиниста за 1 час работы 94 %, при входе сигнала от «Среды» вероятность ошибки возрастает до 96 % за час работы. Генерация изменения погодных условий осуществляется случайным образом.

Дискретно-событийная составляющая модели в AnyLogic (Discrete Event Model) реализуется с помощью функций распределения вероятностей и может быть описана как $\mathrm{ALM} = \{\mathrm{Oper}, \mathrm{Var}\}$. Такая модель используется, когда события происходят в дискретные моменты времени и могут влиять на ход процесса, и позволяет моделировать и анализировать процесс вскрышных работ с учетом случайных факторов и вариабельности.

1. Oper — множество объектов перехода события между выполняемыми операциями, включает в себя следующие элементы:

– Source (Источник): это место, где события начинаются или создаются, например начало производства работ машинистом экскаватора после получения наряд-задания;

– SelectOutput (Выбор выхода): механизм, который определяет, куда будет направлено событие после того как оно возникло. Например, после того как машинист завершил визуальный контроль состояния забоя, SelectOutput поможет определить, какое действие будет следующим: продолжить работу или перейти к устранению возникших нарушений промышленной безопасности в забое.

2. Var — множество переменных, которые используются в модели для хранения данных или состояния процесса. Например, это переменные, которые отслеживают время выполнения каждой операции или события.

Взаимодействие элементов предложенной модели в процессе возникновения и реализации риска ниже рассматривается на примере выполнения технологической операции по экскавации породы из вскрышного забоя машинистом гидравлического карьерного экскаватора. Задача проведения эксперимента по имитационному моделированию процесса проведения вскрышных работ на угольном разрезе в нотации ARIS eEPC сводится к определению того, какая из подсистем («человек», «машина», «среда») вносит наиболее существенный вклад в причинную цепь предпосылок к реализации риска в системе «Ч–М–С».

Результаты исследования. Метод имитационного моделирования применим для априорной оценки возможности реализации риска и его развития в техногенные происшествия. При этом соблюдается требование к массовости и стохастичности исследуемого процесса, что позволяет использовать имитационное моделирование для прогнозирования реализации риска и параметров аварийности и травматизма.

На первом этапе процесса моделирования модель вскрышного забоя из нотации eEPC транслируется в комбинированную модель программной среды AnyLogic, что позволяет определить вероятности наступления событий в правилах ветвления «исключающее ИЛИ» (XOR) и «ИЛИ» (OR). На основе предложенного метода строится модель в AnyLogic. После получения структуры комбинированной имитационной модели определяются численные характеристики объектов модели, необходимые для

проведения имитационного моделирования: показатели для функций eEPC (время выполнения работ), количество исполнителей (организационные единицы), вероятности наступления событий в правилах ветвления, вероятности для XOR и OR. Описание соответствия объектов модели нотации eEPC и элементов комбинированной имитационной модели на языке AnyLogic приведено в таблице 1.

Таблица 1

Описание соответствия объектов модели нотации eEPC и элементов комбинированной имитационной модели на языке AnyLogic

Объект модели eEPC	Графическое обозначение	Соответствующий элемент AnyLogic	Описание элемента AnyLogic
Функция (Function) $F \in X \in G$	Function	Состояние (State) $S_t \in S_{ch} \in A \in ABM$ state	Простое состояние стейтчарта (диаграммы состояний)
Начальное событие (Event) $S_s \in S \in X \in G$	Event	Переход (Transition) $T_{rn} \in S_{ch} \in A \in ABM$	Переход из гиперсостояния стейтчарта в простое состояние. Также может определяться по таймеру, заданному аналитиком
Событие (Event) S_m, $Sf \in S \in X \in G$			
Материальные ресурсы			
Операция (Product/ Service) $P \in X \in G$	Operation/Service	Переменная (Variable) $Var \in E \in ABM$ variable	Переменные используются для моделирования изменяющихся характеристик и для хранения результатов моделирования. Изменение количественных ресурсов происходит в состояниях стейтчарта, программируется на языке Java
Правила ветвления			
Правило ИЛИ (OR rule) $R_{or} \in R \in X \in G$	OR	Переход (Transition) $T_{rn} \in S_{ch} \in A \in ABM$	При переходе из простого состояния стейтчарта в гиперсостояние в методе перехода Action на языке Java программируется логика принятия агентом решения
Правило исключающего ИЛИ (XOR rule) $R_{xor} \in R \in X \in G$	XOR		

В качестве прототипа агентов используются комбинации операций eEPC, которые выполняются в каждой из подсистем «человек», «машина», «среда». Поведение агентов реализовано модулями «операция», «функция», «событие». Переход между операциями осуществляется с временной задержкой, которая определяется стохастически, то есть каждой простой операции задана задержка времени по передаче сигнала к следующей операции. Эта задержка описана соответствующей данной операции функцией распределения вероятности. Вероятностная логика правил ветвления XOR и OR реализуется при переходе между операциями и запрограммирована в соответствующих стохастических узлах модели.

Для технологических операций процесса вскрышных работ функция распределения вероятности времени ее выполнения определена исходя из следующих показателей:

– статистические данные, полученные по результатам проведения хронометражных наблюдений;

– расчетные параметры (расчет интервалов времени операций на основе статистических данных);

– экспертные суждения. При отсутствии статистических данных принималось экспертное значение функции распределения времени операций или вероятности события для стохастического узла. Пример выбора функции распределения вероятности для имитационной модели приведен в таблице 2.

Таблица 2

Пример выбора функции распределения вероятности

Событие	Функция распределения вероятности	Логика выбора функции распределения
Дискретные переходы от приемки смены до начала цикла горно-выемочных работ. Интервалы переходов между операциями выражаются во временных единицах, мин., час.		
Проверка технической готовности экскаватора, мин.	Равномерная (3, 7)	Интервал времени выбран на основании проведённого хронометража
Восприятие и переработка информации машинистом во время выполнения цикла выемочно-погрузочных работ. Интервалы переходов между операциями выражаются во временных единицах, с.		
Визуальный контроль состояния забоя, мин.	Равномерная (1, 3)	Интервал времени выбран на основании проведённого хронометража
Реализация риска при выполнении вскрышных работ. Интервалы переходов между операциями выражаются во временных единицах, с., мин.		
Срабатывание защиты экскаватора для шарикового клапана, с.	Экспоненциальная (166.67, 0.005)	Экспертная оценка Время открытия предохранительного клапана рассматривается как случайное событие. Время открытия предохранительного клапана является случайной величиной со средним значением (математическим ожиданием) μ, функция плотности вероятности экспоненциального распределения имеет вид $f(x) = \lambda * \exp(-\lambda x)$, где x — время открытия клапанов, $\lambda = 1/\mu$ — параметр интенсивности. Время открытия предохранительного клапана (x) составляет от 5 до 15 мс. при скорости движения замыкающего органа от 10 до 30 см/с. Наибольшее быстродействие имеют шариковый и конический клапаны, которые срабатывают за 6 и 8 мс. соответственно. Для предохранительного клапана учтено ограничение времени срабатывания в течение 0,9 с. для избегания поломки исполнительного органа. Значение λ (интенсивность) рассчитано как обратное значение времени открытия: для шарикового клапана: λ = 166.67 мс., для конического клапана: λ = 125 мс.
Вероятности наступления событий в правиле ветвления XOR и OR		
Точность реакции машиниста	Выход true: Гамма (1, 1.42857142857, 0.7)	Экспертная оценка Для моделирования используем гамма-распределение, так как оно позволяет определить вероятности продолжительности времени до определенного события, т. е. реакцию машиниста на отклонения в экстремальных условиях. $X = 0.7$ — это срытое время реакции + переработка единицы информации = 42 с. или 0,7 мин. Так как статистические данные или экспертные оценки отсутствуют, то приняты предположительные значения для параметров α = 1 и $\beta = 1/x$=1/0,7=1,42857142857 (обратное значение минимального времени реакции).

Поведение агента «Среда» задается диаграммой состояния (код на языке Java, который в случайном порядке генерирует изменения погоды: дождь или ветер). Простые условия диаграммы состояния соответствуют функциям eEPC. Диаграмма состояния агента состоит из нескольких простых состояний, в которые переходит агент после выполнения каждой функции. Вероятностная логика правил ветвления XOR и OR реализуется в методе перехода Action на языке Java при смене состояний.

Страница запуска имитационной модели в AnyLogic представлена на рис. 3. При инициации простого эксперимента в среде AnyLogic модель запускается с заданными значениями параметров, поддерживает режим времени, анимацию и отладку модели. Перед началом запуска необходимо выбрать дату начала эксперимента, время и количество машинистов в смене. Количество машинистов в смене по умолчанию равно количеству забоев и количеству экскаваторов в смене.

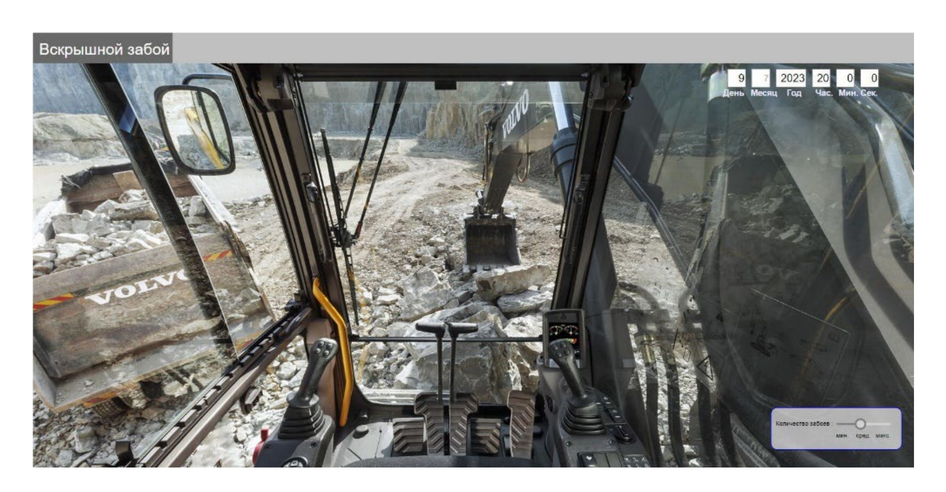


Рис. 3. Страница запуска симуляции комбинированной имитационной модели вскрышного забоя

Фрагмент модели (приемка смены) на основе модели eEPC, её активные объекты и окружение представлены на рис. 4. Активные объекты представляют собой сущности, которые могут выполнять действия, изменять своё состояние и взаимодействовать друг с другом внутри модели. Они представляют собой элементы, которые имеют собственное поведение и могут воздействовать на другие объекты и элементы модели. Окружение — это область, в которой активные объекты выполняют свои действия, перемещаются и взаимодействуют друг с другом (например, физическое пространство — вскрышной забой, кабина экскаватора). В среде дискретно-событийного окружения активные объекты обрабатывают события, изменяют своё состояние и взаимодействуют через событийные очереди.

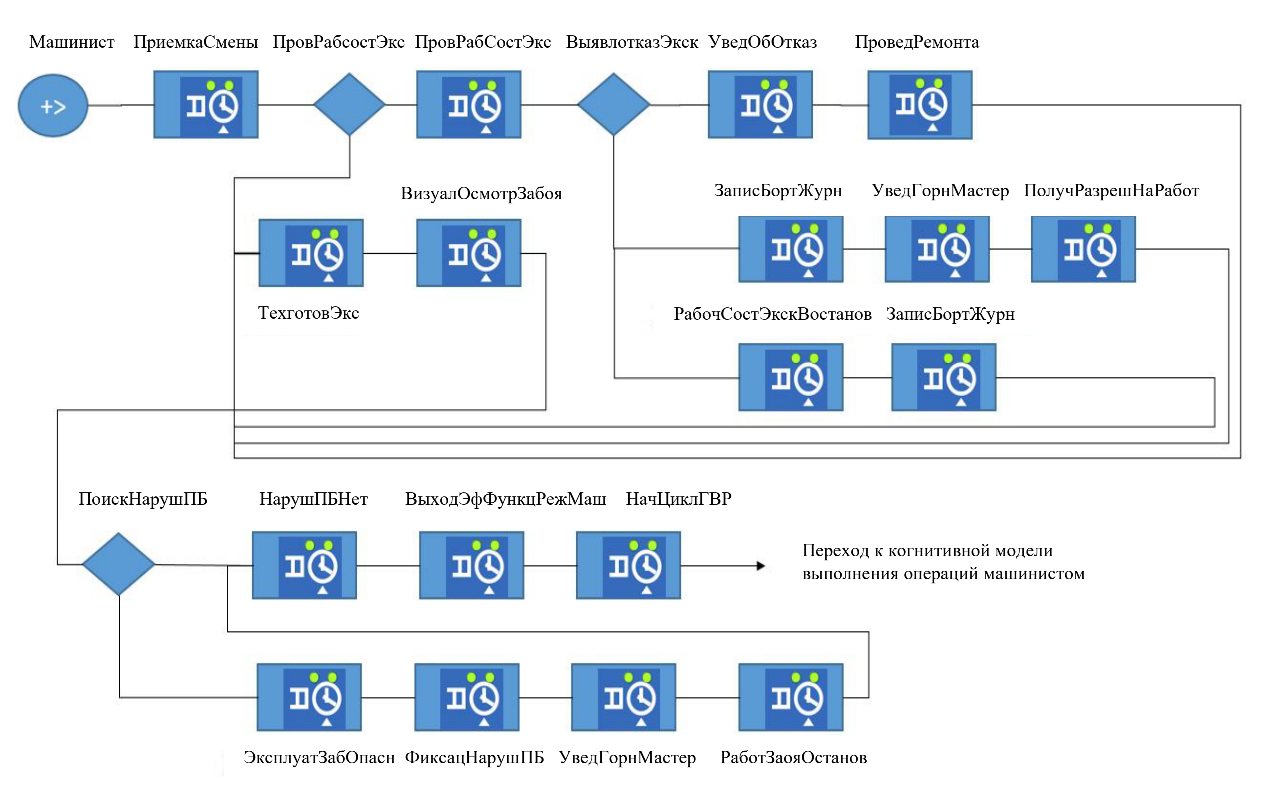


Рис. 4. Активные объекты и их окружение в комбинированной имитационной модели AnyLogic

Результаты сравнения данных моделирования процесса возникновения риска и его перерастания в причинно-следственную последовательность катастрофической аварии и травмирования персонала в системе «Ч–М–С» угольного разреза представлены в таблицах 3–9. Имитационные исследования в системе AnyLogic проводились за одинаковый модельный промежуток времени (11 модельных часов — длительность смены) и с одинаковыми входными данными (с проведением 10 экспериментальных одинаковых прогонов модели). В каждом из экспериментов количество машинистов, экскаваторов и забоев равнялось 5 в смену.

Таблица 3

Статистика показателей надежности подсистемы «машина» и «среда» в системе «Ч–М–С» угольного разреза при приемке смены, в %

№ эксперимента/ операция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
Подсистема «среда»											
Эксплуатация забоя небезопасна	11	5	10	6	15	13	13	16	13	24	13
Эксплуатация забоя безопасна	89	95	90	92	85	87	87	84	88	76	87
Подсистема «машина»											
Аварийный отказ	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Сложные неисправности	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Устраняемые неисправности	–	100	–	–	100	–	–	–	100	–	100
Время в работе	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Время в ремонте	–	–		–	–	–		–	–	–	–

При приемке смены машинистами выявлялись устраняемые неисправности, которые не повлияли на внеплановые простои экскаваторов, вследствие чего экскаваторы все время находились в работе.

В 87 % случаев при приемке смены машинисты не выявляли нарушения требований правил промышленной безопасности в забое. В 13 % случаев нарушения выявлялись, что приводило к простою вскрышного забоя «до устранения нарушений».

Таблица 4

Статистика причин снижения надежности подсистем «машина», «среда» при выполнении цикла выемочно-погрузочных работ, в %

№ эксперимента/ операция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
Подсистема «среда»											
Допущено нарушений по человеческому фактору	46	61	52	67	53	60	64	65	56	48	57
Допущено нарушений по причине неудовлетворительного состояния внешней среды	54	39	48	33	47	40	36	35	44	52	43
Подсистема «машина»											
Допущено отказов при эксплуатации	21	9	25	31	18	24	16	17	25	20	21
Допущено отказов по причине плохой организации работ	79	91	75	69	82	76	84	83	75	80	79

Во время осуществления цикла выемочно-погрузочных работ в ходе визуального контроля машинистами выявлялись отклонения в работе экскаватора и допускались локальные нарушения требований промышленной безопасности во вскрышном забое. Порядка 57 % нарушений в забое приходилось на человеческий фактор, что связано с недостаточно эффективной организацией работ эксплуатирующего персонала (отсутствие должного контроля со стороны линейного ИТР, приостановка работ из-за нарушений). Аналогично недостаточно эффективная организация работ влияла на отказы экскаватора в процессе выполнения работ (непроведение плановых ремонтов, работа на отказ).

Таблица 5

Статистика реакции машиниста на выход системы «Ч–М–С» из динамического равновесия, в %

№ эксперимента/ операция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
Полное устранение отклонения	44	46	42	55	56	56	55	63	46	49	51
Частичное устранение отклонения	24	26	32	22	25	27	18	20	22	30	25
Отклонение устранить невозможно	32	28	26	22	19	17	27	17	32	21	24

В ходе реализации внештатных ситуаций в 51 % случаев машинисты полностью устраняли отклонения от нормального режима эксплуатации экскаватора и забоя. При этом доля частично устранённых нарушений и нарушений, устранить которые не удалось, примерно одинакова.

В строках таблицы 6 через дробь представлены статистические данные о действиях машиниста при нарушении динамического равновесия системы по следующим сценариям: 1 — «выполнено частичное устранение возникших отклонений», 2 — «отклонения устранить невозможно».

Таблица 6

Статистика действий машиниста на выход системы «Ч–М–С» из динамического равновесия, в %

№ эксперимента/ операция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
Точное действие	–/–	7/10	10/–	–/1	–/–	9/14	8/–	7/–	7/5	–/–	8/7
Ошибочное действие	100/100	93/90	90/100	17/16	96/100	91/86	92/100	93/100	93/91	100/100	86/88
Бездействие	–/–	–/–	–/–	–/–	6/–	–/–	–/–	–/–	–/5	–/–	6/5

При частичном устранении отклонения в 86 % случаев попытки машинистов стабилизировать работу системы «Ч–М–С» были ошибочны и только в 8 % успешными. Как следствие, ошибочные действия приводили к росту доли отклонений, которые устранить не удалось.

Таблица 7

Статистика альтернативных исходов модели, в %

№ эксперимента/ тип исхода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
Неблагоприятное воздействие внешней среды	24	22	23	16	24	24	20	19	26	30	23
Отказ экскаватора	12	4	14	16	8	11	7	9	10	7	10
Неэффективная организация работы	43	41	38	32	40	38	42	41	28	35	38
Эксплуатирующий персонал	22	33	25	36	28	27	31	31	36	28	30

Наиболее часто комбинированная модель реализовывала альтернативные исходы, связанные с неэффективной организацией работ и эксплуатирующим персоналом. Таким образом, человеческий фактор являлся основной причиной потери динамического равновесия системой «Ч–М–С» при имитационном моделировании вскрышного забоя.

Таблица 8

Статистика по реализации типа риска в системе «Ч–М–С» угольного разреза, в %

№ эксперимента/тип исхода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
Опасная ошибка	53	55	33	61	55	61	55	48	46	68	53
Опасный отказ	45	40	61	36	39	39	42	48	49	32	43
Эксплуатирующий персонал	3	5	6	3	6	0	3	4	6	–	4

По статистике, чаще всего реализовывался риск, связанный с допущением опасной ошибки машинистами в ходе выполнения вскрышных работ, его доля составила 53 %. На долю опасного отказа экскаватора пришлось 43 % случаев, на эксплуатирующий персонал — 4 %. Таким образом, триггером развития риска является человеческий фактор по причине недостаточно эффективной организации работ. Действие человеческого фактора усиливается ошибкой машиниста в процессе работы, что может приводить к эффекту домино при реализации рисков.

В строках таблицы 9 через дробь представлены результаты моделирования трех исходов эксперимента при реализации риска: 1 — «опасная ошибка», 2 — «опасный отказ», 3 — «нерасчетное внешнее воздействие».

Таблица 9

Статистика исходов эксперимента при реализации риска по трем сценариям, кол-во случаев

№ эксперимента/ тип исхода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Итого
Наступило опасных ситуаций	20/ 17/ 1	29/ 21/ 3	12/ 22/ 2	20/ 12/ 1	17/ 12/ 2	20/ 13/ –	17/ 13/ 1	12/ 12/ 1	16/ 17/ 2	15/ 7/ –	178/ 146/ 13
Устранено опасных ситуаций	19/ 17/ 1	26/ 18/ 3	12/ 21/ 1	17/ 12/ 1	16/ 10/ 1	20/ 13/ –	16/ 12/ 1	9/ 10/ 1	16/ 16/ 2	14/ 6/ –	165/ 135/ 11
Отказ подсистемы «человек»	–/ –/ –	1/ 1/ –	–/ 1/ –	3/ –/ –	–/ –/ 1	–/ –/ –	–/ 1/ –	1/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	5/ 3/ 1
Катастрофа	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –
Инцидент, авария, отказ	–/ –/ –	1/ 1/ –	–/ 1/ –	3/ –/ –	–/ –/ 1	–/ –/ –	–/ 1/ –	1/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	5/ 3/ 1
Травмирование персонала	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –
Отказ подсистемы «машина»	1/ –/ –	2/ 2/ –	–/ –/ 1	–/ –/ –	1/ 2/ –	–/ –/ –	1/ –/ –	2/ 2/ –	–/ 1/ –	1/ 1/ –	8/ 8/ 1
Катастрофа	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –
Инцидент, авария, отказ	1/ –/ –	2/ 2/ –	–/ –/ 1	–/ –/ –	1/ 2/ –	–/ –/ –	1/ –/ –	2/ 2/ –	–/ 1/ –	1/ 1/ –	8/ 8/ 1
Травмирование персонала	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –	–/ –/ –

Анализируя результаты моделирования исхода риска «Опасная ошибка», можно сделать вывод, что в 93 % случаев систему удавалось привести к динамическому равновесию за счет срабатывания защиты экскаватора и точной реакции машиниста. Тем не менее, защита экскаватора отказывала чаще, вследствие чего на реализацию данного риска большее влияния оказала подсистема «машина». В свою очередь, отказ защиты экскаватора может возникать вследствие несвоевременного проведения плановых ремонтов либо непроведения плановых проверок срабатывания штатных защит и блокировок экскаватора, что является следствием воздействия человеческого фактора.

При реализации исхода риска «Опасный отказ» привести систему в динамическое равновесие удавалось в 92 % случаев. При этом отказы подсистемы «машина» также составляют основную причину наступления рискового события «Инцидент/авария/отказ».

При реализации исхода риска «Нерасчетное внешнее воздействие» привести систему в динамическое равновесие удавалось в 85 % случаев. При этом зарегистрировано по одному отказу у подсистемы «человек» и подсистемы «машина».

Обсуждение и заключение. На основе результатов имитационных экспериментов по моделированию процесса возникновения риска и его перерастания в причинную цепь катастрофической аварии и травмирования персонала в системе «Ч–М–С» угольного разреза сделан вывод, что наиболее существенный вклад в предпосылки к реализации риска в системе «Ч–М–С» вносит подсистема «человек». Несмотря на то, что при реализации исходов «Опасный отказ» и «Опасная ошибка» риски «Инцидент/авария/отказ» наступали по причине снижения надежности подсистемы «машина», вызывались они действиями или бездействием персонала, то есть человеческим фактором.

Снижение надежности подсистемы «среда», по результатам имитационного эксперимента, на 57 % обусловлена человеческим фактором (умышленные отклонения от проекта производства работ, допущение нарушений в гонке за объемами). И только 43 % обусловлено последствиями неудовлетворительного состояния забоя. В свою очередь, неудовлетворительное состояние забоя является следствием низкий исполнительской дисциплины машиниста в совокупности с недостаточно эффективным производственным контролем со стороны линейных инженерно-технических работников.

Снижение надежности подсистемы «машина» также является следствием влияния человеческого фактора, так как отказы горнотранспортного оборудования в 79 % случаев происходили по причине недостаточно эффективной организации работ, что приводило к росту внеплановых простоев основного технологического оборудования.

Также следует отметить, что в ходе имитационных экспериментов не наблюдалось реализаций риска аварий с катастрофическими последствиями и травмированием персонала при выполнении вскрышных работ. Из этого факта можно сделать следующие выводы:

1. Применяемые в процессе вскрышных работ меры безопасности и контроля эффективны и успешно предотвращают возникновение серьезных аварий или травм.

2. Использовалась модель безопасности или методология работы, которая демонстрирует высокую эффективность в предотвращении потенциально опасных ситуаций.

3. Результаты экспериментов свидетельствуют о компетентном обучении персонала правилам безопасного выполнения вскрышных работ и строгом соблюдении установленных процедур.

4. Отсутствие случаев травмирования персонала указывает на то, что все системы и оборудование функционируют на уровне, удерживающем риск травмирования на предельно-допустимых значениях.

При этом следует подчеркнуть, что абсолютное отсутствие катастроф и травмирования персонала за время прогона имитационной модели не гарантирует полной безопасности будущих операций. Для подтверждения результатов имитационных экспериментов и дальнейшего обеспечения безопасности рекомендуется проводить систематическую оценку рисков, анализировать предыдущие инциденты и постоянно совершенствовать механизмы и процедуры, нацеленные на удержание/повышение уровня безопасности на угольном разрезе.

Технологии имитационного моделирования впервые в отечественной практике исследований системы «Ч–М–С» получили приложение для анализа показателей комплексной безопасности при проведении открытых горных работ. Представленные результаты и апробация технологии имитационного моделирования могут широко использоваться при анализе безопасности сложных технических систем с учетом влияния человеческого и техногенного факторов.

Список литературы

1. Баришполец В.А., Махутов Н.А., Беккер А.Д., Бобров Ю.В., Власов Ю.В., Гаденин М.М. и др. *Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность сложных «человеко-машинных систем».* Баришпольц В.А. (ред.). Монография. Москва: МГОФ «Знание»; 2021. 432 с.

2. Махутов Н.А. *Безопасность России. Человеческий фактор в проблемах безопасности*. Москва: МГФ «Знание»; 2008. 688 с.

3. Щирый А.О. Совмещение событийной и пошаговой схем дискретного имитационного моделирования. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2022;(12):338–342. https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-12-338-343

4. Хемди А Таха. *Введение в исследование операций*. Москва: Издательский дом «Вильямс»; 2005. 912 с.

5. Зырянов А.А., Доррер М.Г. Оценка показателей бизнес-процессов на основе GERT-сетей. *Хвойные бореальной зоны.* 2012;30(5–6):57–63. URL: https://hbz.sibsau.ru/page/archive (дата обращения: 12.09.2023).

6. Зырянов А.А., Доррер М.Г. Трансляция модели бизнес-процессов в нотации ARIS eEPC в GERT-сеть. В: *Труды XI международной конференции по финансово-актуарной математике и эвентологии безопасности (ФАМЭБ’2012).* Красноярск; 2012. С. 187–197. URL: http://fam.conf.sfu-kras.ru/adds/XI-fames-2012-05-16-e-version.pdf (дата обращения: 09.09.2023).

7. Шеер А.-В. *ARIS-моделирование бизнес-процессов*. 3-е изд. Москва: Издательский дом «Вильямс»; 2009. 223 с.

8. Глухова К.И., Бекмансурова А.Р., Кучина Т.Н. Порядок действий при автоматизации бизнес-процессов. *Chronos: естественные и технические науки.* 2020;5(33):9–10. https://doi.org/10.24412/2712-9691-2020-533-9-10

9. Штыкова А.С. Обзор некоторых возможностей среды Anylogic. *Форум молодых ученых.* 2017;2(6):301–306.

10. Доррер М.Г., Ланцев Е.А., Шаргаева А.И. Событийный анализ бизнес-процессов в нотации eEPC. В: *Труды XV Международной конференции по эвентологической математике и смежным вопросам.* Красноярск; 2011. С. 89–96. URL: https://sciup.org/140277916 (дата обращения: 09.10.2023).

11. Ланцев Е.А., Доррер М.Г. Получение агентной имитационной модели из дискретно-событийного описания бизнес-процесса. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление.* 2013;3(174):44–52. URL: https://infocom.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2013/3/05_lantsev.pdf (дата обращения: 09.10.2023).

References

1. Barishpolets VA, Makhutov NA, Bekker AD, Bobrov YuV, Vlasov YuV, Gadenin MM, et al. *Bezopasnost' Rossii. Pravovye, sotsial'no-ekonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty. Bezopasnost' slozhnykh cheloveko-mashinnykh sistem.* Barishpolets V.A. (red.). Monograph. Moscow: IHPF Znanie; 2021. 432 p. (In Russ.).

2. Makhutov NA. *Security of Russia. The human factor in security problems.* Moscow: IHPF Znanie; 2008. 688 p. (In Russ.).

3. Shchiryi AO. Sovmeshchenie sobytiinoi i poshagovoi skhem diskretnogo imitatsionnogo modelirovaniya. *News of the Tula state university. Technical sciences.* 2022;(12):338–342. https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-12-338-343 (In Russ.).

4. Khemdi A Takha. *Vvedenie v issledovanie operatsii.* Moscow: Williams Publishing house; 2005. 912 p. (In Russ.).

5. Zyryanov AA, Dorrer MG. Otsenka pokazatelei biznes-protsessov na osnove GERT-setei. *Conifers of the boreal area.* 2012;30(5–6):57–63. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-pokazateley-biznes-protsessov-na-osnove-gert-setey/viewer (accessed: 12.09.2023). (In Russ.).

6. Zyryanov AA, Dorrer MG. Translyatsiya modeli biznes-protsessov v notatsii ARIS eEPC v GERT-set'. In: *Proceedings of XI international conference on financial and actuarial mathematics and eventology of safety.* Krasnoyarsk; 2012. P. 187–197. URL: http://fam.conf.sfu-kras.ru/adds/XI-fames-2012-05-16-e-version.pdf (accessed: 09.09.2023). (In Russ.).

7. Sheer AV. *ARIS-modelirovanie biznes-protsessov.* 3-d ed. Moscow: Williams Publishing house; 2009. 223 p. (In Russ.).

8. Glukhova KI, Bekmansurova AR, Kuchina TN. Poryadok deistvii pri avtomatizatsii biznes-protsessov. *Chronos: estestvennye i tekhnicheskie nauki.* 2020;5(33):9–10. https://doi.org/10.24412/2712-9691-2020-533-9-10 (In Russ.).

9. Shtykova AS. Obzor nekotorykh vozmozhnostei sredy Anylogic. *Forum molodykh uchenykh.* 2017;2(6):301–306.

10. Dorrer MG, Lantsev EA, Shargaeva AI. Sobytiinyi analiz biznes-protsessov v notatsii eEPC. In: *Trudy XV Mezhdunarodnoi konferentsii po eventologicheskoi matematike i smezhnym voprosam.* Krasnoyarsk; 2011. P. 89–96. URL: https://sciup.org/140277916 (accessed: 09.10.2023). (In Russ.).

11. Lantsev EA, Dorrer MG. Creating agent-based model from the business process discrete-event model. *Computing, Telecommunication, and Control.* 2013;3(174):44–52. URL: https://infocom.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2013/3/05_lantsev.pdf (accessed: 09.10.2023). (In Russ.).

Поступила в редакцию 20.09.2023
Поступила после рецензирования 03.10.2023
Принята к публикации 06.10.2023

Об авторах:

Максим Александрович Ковалев, аспирант Красноярского филиала Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий (660049, РФ, г. Красноярск, просп. Мира, 53), ORCID, kovalevmalk@gmail.com

Владимир Викторович Москвичев, доктор технических наук, профессор кафедры техносферной и экологической безопасности Сибирского федерального университета, директор Красноярского филиала Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий (660049, РФ, г. Красноярск, просп. Мира, 53), SPIN-код: 9332-6468, ScopusID, ResearcherID, AuthorID, ORCID, krasn@ict.nsc.ru

Заявленный вклад соавторов:

М.А. Ковалев — описание теоретической части методологии исследования, проведение имитационного эксперимента в среде AnyLogic.

В.В. Москвичев — анализ корректности полученных результатов, рецензирование научной статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 20.09.2023
Revised 03.10.2023
Accepted 06.10.2023

About the Authors:

Maksim A. Kovalev, Postgraduate student, Krasnoyarsk branch of the Federal Research Center for Information and Computing Technologies (53, Mira Ave., Krasnoyarsk, 660049, RF), ORCID, kovalevmalk@gmail.com

Vladimir V. Moskvichev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Technosphere and Environmental Safety Department, Siberian Federal University, Director of the Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computing Technologies (53, Mira Ave., Krasnoyarsk, 660049, RF), ScopusID, ResearcherID, SPIN-code: 9332-6468, AuthorID, ORCID, krasn@ict.nsc.ru

Claimed contributorship:

MA Kovalev: description of the theoretical part of the research methodology, simulation experiment in the AnyLogic environment.

VV Moskvichev: analysis of the correctness of the results obtained, review of the scientific article.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.